Biochar

Le mot **Biochar** est un néologisme anglais, composé du préfixe *bio* et du mot charcoal [1], qui signifie *charbon de bois*. Il faut le traduire par: **charbon à usage agricole**. Le mot anglais *Biochar* est parfois traduit par le mot *Biocharbon* ce qui ne convient pas vraiment (quasi tous les charbons, y compris ceux fossile, ont une origine biologique).

- Le mot biocharbon désigne plutôt le charbon de bois, simple carburant.
- le mot *Biochar* désigne plutôt du charbon de bois pilé, utilisé pour *améliorer* ou restaurer les sols, tropicaux notamment (cultivés ou non),
- le mot Agrichar [2] désignerait aussi pour les anglophones (australiens notamment) le charbon de bois destiné à enrichir les sols agricoles, produit et commercialisé par la société australienne Bestenergies[3]

Principaux usages

- **amendement** destiné à restaurer ou améliorer les sols: il est alors intégré, sous forme de poudre ou de petits fragments, dans des sols de pépinière, de forêt, agricoles, de jardin ou horticoles (pots de fleur), dans le but d'améliorer les propriétés pédologiques (physiques, chimiques, biologiques) du substrat. Le *biochar* est étudié et recommandé par un nombre croissant d'auteurs pour améliorer et stabiliser les sols tropicaux, naturellement acides et pauvres, donc fragiles, qui ont été fortement dégradés par l'agriculture et/ou la déforestation, et sont actuellement érodés ou menacés par l'érosion[4].
- **fixation du carbone dans les sols**: le *biochar*, en tant que produit riche en carbone, stable et durable, a aussi une fonction de puits de carbone, ce qui explique qu'il suscite un intérêt croissant dans le contexte des préoccupations concernant le réchauffement climatique d'origine humaine. Il pourrait être une des solutions immédiates à l'impact globalement négatif des activités agricoles, car l'agriculture, si elle n'utilise que peu de carbone fossile sous la forme de carburants (environ 1 % de la consommation totale en France, à titre d'exemple), est fortement émettrice de gaz à effet de serre (18 % du total environ en France), et le travail du sol a dégradé le puits de carbone que constitue l'humus. De plus, une grande partie des palmiers à huile, du soja et des agrocarburants ont été cultivés depuis la fin du XX^e siècle en détruisant les forêts tropicales (par le feu le plus souvent, c'est-à-dire en libérant le carbone stocké dans la biomasse ligneuse), en dégradant les sols protégés et enrichis en carbone par la forêt. Le *biochar*, source d'humus, permet de restaurer la capacité des sols à stocker une partie du carbone produit par la biomasse végétale.
- **substitut à d'autres usages du charbon de bois ou charbon de bois activé** : par exemple, l'introduction de *biochar* dans un sol améliore la qualité de l'eau qui y circule (il joue le rôle de filtre), et pourrait ainsi accroître la productivité des cours d'eau et des zones humides, en améliorant la ressource halieutique et en favorisant le retour d'un *bon état écologique* des masses d'eau superficielles et souterraines.
- **alternative au charbon de bois (quand il est produit avec des déchets agricoles)** : certains espèrent que son usage pourra ainsi réduire la pression sur les dernières forêts anciennes[5].

Bénéfices pour les sols

Des expériences scientifiques récentes[4] laissent penser que le *biochar* (surtout s'il est associé à un apport de matière organique) peut contribuer à restaurer de nombreux types de sols tropicaux, même très acides et très altérés. Il pourrait ainsi jouer un rôle dans la restauration des forêts tropicales, mais aussi un rôle agronomique. Plutôt qu'un amendement (car il est très pauvre en nutriments), le *biochar* se comporterait comme un *(re)structurateur*[4] du sol et peut-être comme un catalyseur, via des mécanismes d'action encore mal compris. Le taux de matière organique joue un rôle important dans la stabilité et la fertilité des sols, notamment pour ceux fortement exposés aux pluies tropicales[6].

VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

Près de Manaus (Brésil), des scientifiques[4] ont récemment testé l'application combinée d'engrais organiques et de charbon de bois, en différentes proportions, sur des parcelles de sols acides et très altérés, en les comparant à des parcelles témoins. Le charbon de bois utilisé a été produit à partir d'arbres d'une forêt secondaire locale, puis broyé en fragments de 2 mm maximum, incorporés au sol à raison de 11 Mg (t) par ha, ce qui correspond au taux attendu à la suite d'une culture sur brûlis dans une forêt secondaire moyenne poussant sur un sol ferralitique de l'Amazonie centrale[7]. Quinze combinaisons d'amendements ont été testées, apportant dans chaque cas une quantité égale de carbone (C), mais avec des proportions différentes de fumier de volaille, de compost, de charbon de bois ou de litière forestière. Ces sols ont ensuite subi quatre cycles de culture de riz (*Oryza sativa* L.) et de sorgho (*Sorghum bicolor* L.). L'expérience a démontré qu'on pouvait fortement augmenter les stocks d'éléments nutritifs dans la rhizosphère (zone racinaire), tout en réduisant le lessivage des éléments nutritifs du sol et en augmentant la productivité agricole.

- La production de biomasse végétale a fortement chuté dès la seconde récolte là où seuls des engrais minéraux avaient été appliqués, bien que pouvant perdurer plus longtemps avec apport de matière organique. Une seule application de compost a quadruplé le rendement par rapport aux parcelles seulement fertilisées par des engrais minéraux[4].
- Dans les sols fertilisés avec des fientes de volaille, les teneurs initialement élevées en azote (N) et potassium (K) ont chuté au cours des quatre cycles de culture mais les fientes de poulet ont néanmoins augmenté le rendement par rapport à un sol n'en ayant pas reçu, et ce au cours de quatre saisons, en élevant le pH du sol et les teneurs en phosphore (P), calcium (Ca) et magnésium (Mg). Et ce sol est resté plus fertile après la 4^{e} récolte[4].
- La hausse de rendements entraîne une exportation accrue d'éléments nutritifs. Mais même si un taux significatif de nutriments (P, K, Ca, Mg, et N) a été exporté des parcelles ayant reçu du charbon de bois, les teneurs en éléments nutritifs du sol n'ont pas diminué de la même manière selon que le sol a reçu ou non un apport d'engrais minéraux ou organiques[4].
- C'est l'effet sur la stabilité du taux de carbone du sol qui a été le plus spectaculaire: les pertes en carbone des parcelles testées ont été les plus élevées sur les sols amendés par les fientes de volaille (- 27 %) et par le compost (- 27 %), suivies par les sols ayant reçu de la litière forestière (- 26 %) puis par la parcelle témoin (- 25 %), alors que les parcelles ayant reçu du charbon de bois n'ont perdu que 8 % de leur carbone pour la parcelle ayant aussi initialement reçu un engrais minéral et 4 % pour la parcelle n'ayant été enrichie qu'en charbon de bois[4].
- Dans tous les cas, le *biochar* a significativement amélioré la croissance des plantes, et il a réduit la quantité d'engrais requise. La productivité des céréales a doublé sur la parcelle traitée par le charbon de bois en plus des engrais NPK, par rapport à la parcelle ayant reçu les engrais NPK sans charbon de bois.

Le charbon de bois augmente donc bien la fertilité du sol, surtout si une autre source de nutriments est ajoutée, mais par un mécanisme encore mal connu. Les auteurs émettent l'hypothèse qu'il contribue à mieux fixer les nutriments ajoutés par ailleurs, en les empêchant d'être lessivés (donc perdus) dans les sols soumis à une pluviométrie importante et par ailleurs pauvres en argile.

Les auteurs concluent donc qu'un apport combiné en matière organique et en *biochar* pourrait produire un sol imitant les propriétés favorables des Terra preta[4].

Hypothèses explicatives

- **Cycle de l'eau amélioré:** Le charbon de bois augmente indirectement la rétention d'eau des sols, probablement à la suite de l'enrichissement secondaire des sols macroporeux en matière organique[8]. Tryon[9] a montré dès 1948 que l'impact d'apports de charbon de bois sur l'eau disponible de sols forestiers variait selon la texture du sol: seuls les sols sableux voyaient leur teneur en eau fortement augmentée (plus que doublée). Cet auteur n'observait aucun changement dans les sols limoneux, et les sols argileux perdaient même un peu de leur capacité à retenir l'eau, vraisemblablement en raison de l'hydrophobicité du charbon de bois. Les sols à texture grossière (sableuse ou caillouteuse) seraient donc les seuls à profiter des bénéfices hydriques permis par le *biochar*. Une expérience a

par exemple montré que la teneur en eau d'un sol sableux passait de 18 % à plus de 45 % (en volume) à la suite de l'apport de charbon de bois. Comme les sols sableux protégés par le couvert forestier, ces sols sableux enrichis en *biochar* sont aussi plus résistants à l'érosion. Cependant, si on prélève des sols sableux et qu'on les fait sécher puis qu'on les réhumidifie, ils ne retrouvent pas cette stabilité avant un certain temps (plusieurs mois en général), même artificiellement réhumidifiés. Ceci laisse supposer que les sols superficiels exposés au soleil et à une déshydratation complète pourraient ne pas bénéficier des effets positifs du *biochar*, au moins en surface.

- **Cycle de l'azote amélioré:** La fixation microbienne de l'azote (celui capté dans l'air) expliquerait pour partie la conservation de la richesse du sol et celle des ions nitrate (NO3-), normalement très lessivables car solubles dans l'eau[10],[11].
- **Cycle du carbone amélioré :** Une disponibilité suffisante en carbone (permise ou restaurée par le biochar) stimulerait l'activité microbienne du sol, et sur une plus grande profondeur, en améliorant par là le cycle de l'Azote, avec une moindre lixiviation des nitrates. Steiner et ses collaborateurs avaient en 2004 montré[12] que la croissance microbienne était améliorée par ajout de glucose dans un sol enrichi en charbon de bois, sans augmentation du taux de respiration du sol. Ce contraste entre une faible émission de CO_2 par le sol et un fort potentiel de croissance microbienne est justement l'une des caractéristiques des terres noires amazoniennes ou Terra preta[12].
- **Détoxification**: Le *biochar* fixe aussi divers toxiques présents dans les solutions du sol, et facilite l'épuration bactérienne de l'eau et des gaz du sol. Par exemple de nombreux sols tropicaux ont des teneurs en aluminium et en mercure beaucoup plus élevées qu'en zone tempérée. La présence de charbon de bois diminue la biodisponibilité de ces toxiques[13]. Sur les sols ferralitiques testés par Steiner, riches en aluminium libre, l'apport en charbon de bois a aussi diminué le taux d'ions aluminium échangeables dans le sol, par un mécanisme également encore mal compris. Steiner note que l'aluminium était le mieux fixé quand des engrais minéraux étaient appliqués conjointement au charbon de bois (de 4,7 à 0 mg.kg-1)[4] L'aluminium libre est un facteur toxique limitant la croissance des plantes[14].
- **Effet-tampon sur l'acidité du sol :** Un pH trop acide limite la production agricole[15]. L'acidité excessive est en soi un problème direct pour le développement des végétaux mais aussi indirect parce que l'acidité rend de nombreux toxiques (métaux notamment) plus biodisponibles. Stéphanie Topoliantz[16] a montré que le charbon de bois améliorait la culture légumière sur un sol tropical acide, en diminuant le taux d'aluminium biodisponible, mais aussi en diminuant l'acidité du sol. Indirectement, le *biochar* favorise également la fixation de l'ion carbonate qui tamponne le pH du sol, facilitant ainsi le développement bactérien et limitant la biodisponibilité des toxiques naturels du sol[17].
- **Réhumification :** Une augmentation du taux de matière organique (humus) fait suite à l'oxydation lente du charbon de bois[18],[19]. Cette augmentation pourrait aussi stimuler la désorption des phosphates et sulfates utiles aux plantes en offrant des anions alternatifs[20].

D'autres aspects (catalytiques ou synergiques) interviennent peut-être, qui pourraient être mis à jour par les recherches en cours.

Production contemporaine de biocharbon et *biochar*

Plusieurs types de production artisanales et industrielles coexistent :

- Production traditionnelle de *biochar* à partir de techniques séculaires (combustion lente de bois en meule recouverte de terre)[21].
- Production industrielle (pyrolyse contrôlée): l'industrie le produit sous forme de granulés (débris de bois recyclés ou résidus forestiers ayant subi un traitement thermique de type thermolyse), présentés comme une source intéressante d'énergie renouvelable[22] (aspect parfois discuté à cause du risque de priver la forêt du bois mort nécessaire au cycle sylvigénétique et à la préservation de la biodiversité[23]).

- Coproduction industrielle dans l'industrie de la canne à sucre, utilisant la bagasse comme biomasse pour valorisation énergétique. L'écume, sous-produit de cette combustion, peut être considérée comme un biochar. Elle est valorisée en agriculture.

Le *biocharbon* peut aussi être fabriqué à partir de poussières de charbon de bois alors agglomérées avec environ 20 % d'argile[24].

- Production combinée à un cycle de production de biocarburant ou d'agrocarburant, avec production d'énergie via des processus (exothermiques) permettant aussi une production de chaleur (voire d'électricité, en cogénération) produisant plus d'énergie que l'énergie investie[25].
  L'énergie nécessaire pour produire du charbon de bois reste plus importante que celle nécessaire pour produire des agrocarburants de type éthanol à partir de maïs[25].
- La production de *biochar* à usage agricole reste marginale (but see[26]).

Histoire

Des pédologues, archéologues et écologues ont récemment étudié un type de sol particulier, très noir et riche, trouvé en Amazonie et dit *« Amazonian Dark Earths »* (ou ADE) ou *Terra preta do índio*.

Il est apparu que ce sol ne semblait pas naturel, et qu'il ne se serait développé en Amérique du Sud qu'entre 500 et 9 000 ans avant nos jours, toujours associé à la présence de l'Homme, ce pourquoi on le qualifie parfois d'*anthroposol*. Les Amérindiens de l'époque précolombienne auraient donc (sciemment, ou non, la question reste débattue) utilisé l'enrichissement du sol en charbons de bois, améliorant ainsi la stabilité et la fertilité des sols cultivés[27],[28],[29].

L'analyse moléculaire des restes de charbons du sol laisse penser que si une partie du charbon provenait du bois brûlé lors du défrichement, une autre partie, significativement mieux représentée en profondeur, provenait de la combustion incomplète des déchets agricoles ou du bois dans les foyers domestiques[30].

Ce sont ces sols que les colons européens ont appelé *Terra preta do índio*. Divers auteurs ont montré qu'intégrer du charbon de bois dans des sols tropicaux fortement érodés ou érodables améliorait significativement leurs propriétés physiques, biologiques et chimiques[8].L'équivalent moderne de ce charbon serait celui produit par l'utilisation de certaines formes de pyrolyse chauffant la biomasse à relativement basse température en l'absence d'oxygène dans des fours spéciaux[31].

Prospective et perspectives de développement : Le *biochar* est depuis quelques années à nouveau utilisé pour améliorer des sols agricoles dans divers pays tropicaux, mais le biocharbon est aussi un des agrocarburants possibles, en substitution aux énergies fossiles. Il est fabriqué de manière artisanale dans les pays pauvres, mais des projets industriels sont annoncés dans certains pays riches. Ainsi Thenergo (groupe spécialisé dans les solutions énergétiques soutenables) a en 2007 annoncé la création, au nord des Pays-Bas, d’une unité de cogénération au biocharbon pour une puissance de 5 MW en brûlant 75 000 t/an de biocharbon en granulés[32]. Il convient de mentionner cependant le danger que peuvent faire courir de telles pratiques à grande échelle par rapport à la nécessaire protection des forêts tropicales[33].

Potentiel de séquestration de carbone

Les sols de la planète (sols naturels relictuels + sols cultivés) contiendraient aujourd'hui 3,3 fois plus de carbone que l'atmosphère, soit 4,5 fois plus que la biomasse des plantes et des animaux terrestres n'en renferme hors-sol[34], mais la plus grande partie du carbone piégé dans le sol est perdue, dans l'atmosphère sous la forme de CO_2 ou de méthane, deux gaz à effet de serre, ou dans l'eau sous forme d'acide carbonique, quand des écosystèmes naturels sont labourés et mis en culture, et des millions d'hectares de sols naturels, forestiers notamment, sont ainsi mis en culture tous les ans, notamment pour la production de biocarburants[35].



Une partie de la production de charbon de bois (dont celle effectuée à partir de déchets agricoles) pourrait contribuer à restaurer les sols tropicaux, avec un écobilan qui reste à faire pour le charbon produit à partir du bois

Le Biochar et la terra preta qu'il peut former peuvent contribuer à la séquestration du carbone dans les sols végétalisés (cultivés ou forestiers) durant des centaines de milliers d'années[36],[37].

Non seulement le *biochar* peut enrichir les sols en y augmentant fortement et durablement le taux de carbone (150 g C/kg de sol par rapport à 20-30 g C/kg dans les sols environnants), mais les sols enrichis par du biochar se développent naturellement plus en profondeur; ils sont, en moyenne, plus de deux fois plus profonds que les sols environnants[réf. nécessaire]. Par conséquent, le carbone total stocké dans ces sols peut être d'un ordre de grandeur plus élevé que les sols adjacents[38],[39].

Autre intérêt pour la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre

- Le biochar diminue les émissions du sol en CO_2 et méthane, mais aussi en protoxyde d'azote (N_2O ou oxyde nitreux), trois gaz à effet de serre préoccupants pour le climat[40]. Yanai et ses collaborateurs ont même constaté une suppression des émissions de N_2O quand du biochar a été ajouté au sol[41].
- Le piégeage et le stockage à long terme du carbone par le biochar ne nécessitent ni progrès technique ni recherche fondamentale car ses outils de production sont robustes et simples, ce qui le rend approprié pour de nombreuses régions du monde[31]. Dans sa publication fameuse dans le journal *Nature* Johannes Lehmann, de l'université Cornell, a estimé que la pyrolyse du bois sera rentable quand le coût de la tonne de CO_2 atteindra 37 dollars US[31].
- Utiliser la pyrolyse du bois pour la production de bioénergie est déjà possible, même si elle est encore aujourd'hui plus chère que l'usage d'énergies fossiles.

Aspects et avantages sanitaires

En termes d'écobilan écotoxicologique, les avantages semblent l'emporter sur les inconvénients et doivent encore être précisés par la recherche. Parmi les inconvénients, il faut citer les goudrons et le monoxyde de carbone produits lors de la production de charbon de bois, qui sont des polluants et des toxiques ou cancérigènes avérés. Mais cet aspect négatif est à mettre en balance avec le fait que le charbon de bois contribue à détoxifier l'eau[42] et à la différence du fumiers et des fientes non compostés, le biochar ne pose a priori pas de problèmes d'introduction de germes pathogènes. Ceci présente notamment un avantage pour les cultures de légumes frais ou plantes à croissance rapide et se mangeant crus (radis, carottes, salades, etc.) qu'il ne vaut mieux pas mettre en contact direct avec des fumiers pour limiter les épidémies et le risque zoonotique.

Limites, et précautions écologiques et éthiques à prendre

- Si ce biochar est produit, non pas à partir de déchets agricoles, mais à partir de bois issu de forêts anciennes ou primaires ou de vastes coupes rases, son bilan écologique est nettement moins bon (il est aussi source de CO_2, et la déforestation qu'il pourrait induire si on le produit à partir d'arbres forestiers pourrait aggraver l'érosion, la perte d'eau utile et la perte de biodiversité).
- S'il est utilisé sur des sols naturellement très acides et très oligotrophes où la biodiversité est dépendante de la pauvreté du sol, ou sur des sols dégradés mais localement devenus des refuges pour les espèces des milieux oligotrophes menacées par l'eutrophisation générale de l'environnement, le biochar peut être un facteur de recul de la biodiversité.
- De même, certains projets visant à collecter le petit bois et les rémanents des forêts pour produire du biochar pourraient être contre-productifs et appauvrir la forêt en la privant d'une partie de sa litière et du bois mort, qui constituent une source naturelle de carbone issue de la biomasse/nécromasse, nécessaire au cycle sylvogénétique[43].
- Enfin divers matériels ont été récemment produits ou améliorés, parfois avec l'aide d'ONG environnementales, pour valoriser des déchets agricoles ou des roseaux (balle de riz, Typha…) en biocharbon vendu en plaquettes substituables au charbon de bois domestique, qui est coûteux et contribue à la déforestation. L'écobilan de ce biocharbon reste à faire, car il peut – si produit à grande échelle – priver les sols agricoles de la matière organique qui leur est nécessaire. De plus la biomasse issus d'herbacé agricole est parfois très riche en chlore (fétuque, 0,65 % de la matière sèche) qui pourraient produire des dioxines et furanes lors de la fabrication du charbon et/ou lors de sa combustion en cuisine (brochettes, barbecues), cendres et fumées pouvant alors être également contaminées[44].
- De même une utilisation trop intensive des roselières priverait de nombreux oiseaux, amphibiens, mollusques, etc. de leur habitat.[45]

C'est donc (dans les limites évoquées ci-dessus) une solution localement utile et recommandée par un nombre croissant de chercheurs et agronomes (par exemple pour des plans de restauration de sols), mais qui pourrait aussi dans certains cas avoir des effets négatifs, éventuellement irréversibles sur certains sols naturellement pauvres en nutriments et pour cette raison riches en biodiversité, en particulier des milieux abritant des espèces endémiques rares). Une de ses utilisations les plus immédiates et avantageuses est de permettre de passer de la « culture sur brûlis » ("slash-and-char" pour les anglophones) à une agriculture plus sédentaire gérant et protégeant ses sols (en association avec des jachères tournantes sur les sols les plus fragiles) pour stopper ou freiner la déforestation et la dégradation des sols conformément aux objectifs de l'ONU et de la FAO.

Notes et références

[1] http://en.wikipedia.org/wiki/Charcoal
[2] http://en.wikipedia.org/wiki/Agrichar
[3] http://www.bestenergies.com/
[4] Steiner C, Teixeira WG, Lehmann J, Nehls T, Vasconcelos de Macêdo JL, Blum WEH, Zech W (2007) Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. Plant and Soil 291: 275-290. (http://www.css.cornell.edu/faculty/lehmann/publ/PlantSoil, online, 2007, Steiner.pdf)
[5] Laird DA (2008) The charcoal vision: a win–win–win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality. Agronomy Journal 100: 178-181. (http://agron.scijournals.org/cgi/content/full/100/1/178)
[6] Tiessen H, Cuevas E, Chacon P (1994) The role of soil organic matter in sustaining soil fertility. Nature 371:783–785. (http://www.nature.com/nature/journal/v371/n6500/abs/371783a0.html)
[7] Lehmann J, da Silva JP Jr, Rondon M, Cravo MdS, Greenwood J, Nehls T, Steiner C, Glaser B (2002) Slash and char: a feasible alternative for soil fertility management in the central Amazon? In: Soil science: confronting new realities in the 21st century, Transactions of the 17th World Congress of Soil Science, Bangkok, Thailand, 14-21 août 2002, Symposium Nr 13, Paper Nr 449, 12 pp. (http://www.css.cornell.edu/faculty/lehmann/publ/Lehmann et al., 2002, WCSS Bangkok, paper no.0449.pdf)
[8] Glaser B, Lehmann J, Zech W (2002) Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: a review. *Biology and Fertility of Soils* 35:219–230. (http://www.dcm.nt.gov.au/__data/assets/file/0012/43140/14b.pdf)

[9] Tryon EH (1948) Effect of charcoal on certain physical, chemical, and biological properties of forest soils. Ecological Monographs 18:81-115. (http://www.esajournals.org/doi/abs/10.2307/1948629)

[10] Bengtsson G, Bengtson P, Månsson KF (2003) Gross nitrogen mineralization-, immobilization-, and nitrification rates as a function of soil C/N ratio and microbial activity. Soil Biology and Biochemistry 35:143–154. (http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TC7-47C4934-3&_user=10&_coverDate=01/31/2003&_alid=1290317841&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_cdi=5163&_sort=r&_docanchor=&view=c&_ct=1&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=4830d963f371c8f3d281b4c5f42e66aa)

[11] Burger M, Jackson LE (2003) Microbial immobilization of ammonium and nitrate in relation to ammonification and nitrification rates in organic and conventional cropping systems. Soil Biology and Biochemistry 35:29–36. (http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TC7-4760298-1&_user=10&_coverDate=01/31/2003&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1290311336&_rerunOrigin=google&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=419f2236da6e274701f3b9d3f6545024)

[12] Steiner C, Teixeira WG, Lehmann J, Zech W (2004) Microbial response to charcoal amendments of highly weathered soils and amazonian dark earths in central Amazonia: preliminary results. In: Glaser B, Woods WI (eds) Amazonian Dark Earths: explorations in space and time. Springer, Heidelberg, pp 195–212

[13] Ma JW, Wang FY, Huang ZH, Wang H (2010) Simultaneous removal of 2,4-dichlorophenol and Cd from soils by electrokinetic remediation combined with activated bamboo charcoal. Journal of Hazardous Materials 176:715-720. (http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20006426)

[14] Sierra J, Noël C, Dufour L, Ozier-Lafontaine H, Welcker C, Desfontaines L (2003) Mineral nutrition and growth of tropical maize as affected by soil acidity. Plant and Soil 252:215–226 (http://www.springerlink.com/content/tx34047753066640/)

[15] Fageria NK, Baligar VC (2008) Ameliorating soil acidity of tropical Oxisols by liming for sustainable crop production. Advances in Agronomy 99:345–399 (http://www.ars.usda.gov/research/publications/publications.htm?seq_no_115=222552)

[16] Topoliantz S, Ponge JF, Ballof S (2005) Manioc peel and charcoal: a potential organic amendment for sustainable soil fertility in the tropics. Biology and Fertility of Soils 41:15–21 (http://www.springerlink.com/content/m21ndrnm09nd1ep4/)

[17] Kreutzer K (2003) Effects of forest liming on soil processes. Plant and Soil 168:447-470 (http://www.springerlink.com/content/l06h3jv48u074r18/?p=136e71de1a204b75bcc1d550f588326f&pi=51)

[18] Brodowski S, Amelung W, Haumaier L, Zech W (2007) Black carbon contribution to stable humus in German arable soils. Geoderma 139:220-228. (http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V67-4NC5V80-1&_user=10&_coverDate=04/15/2007&_rdoc=23&_fmt=high&_orig=browse&_srch=doc-info(#toc#5807#2007#998609998#647634#FLA#display#Volume)&_cdi=5807&_sort=d&_docanchor=&_ct=30&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=9afadfb20a623a0ab4ad682e03a58912)

[19] Keiluweit M, Nico PS, Johnson MG, Kleber M (2010) Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). Environmental Science and Technology 44:1247-1253. (http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es9031419)

[20] Duxbury JM, Smith MS, Doran JW, Jordan C, Szott L, Vance E (1989) Soil organic matter as a source and a sink of plant nutrients. In: Coleman DC, Oades JM, Uehara G (eds) Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems. University of Hawaii Press, Honolulu, p 33–67

[21] Adam JC (2009) Improved and more environmentally friendly charcoal production system using a low-cost retort-kiln (Eco-charcoal). Renewable Energy 8:1923-1925. (http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V4S-4VF0XS3-3&_user=10&_coverDate=08/31/2009&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1368224271&_rerunOrigin=google&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=02bd78225be753ba6b40d32493b02e49)

[22] Al-Kassir A, Ganan-Gomez J, Mohamad AA, Cuerda-Correa EM (2010) A study of energy production from cork residues: sawdust, sandpaper dust and triturated wood. Energy 1:382-386. (http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V2S-4XMC01B-1&_user=10&_coverDate=01/31/2010&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1368228422&_rerunOrigin=google&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=8884458e604b13c20e84a7be1f2e1445)

[23] Christensen M, Rayamajhi S, Meilby H (2009) Balancing fuelwood and biodiversity concerns in rural Nepal. Ecological Modelling 4:522-532. (http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VBS-4V34G8R-2&_user=10&_coverDate=02/24/2009&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=d045ad1403558cd2ead51e35ee6442b4)

[24] (http://www.transition-energie.com/senegal-du-charbon-vert-a-partir-dun-roseau/)

[25] Gaunt JL, Lehmann J (2008) Energy balance and emissions associated with *Biochar* sequestration and pyrolysis bioenergy production. Environmental Science and Technology 42:4152-4158. (http://www.css.cornell.edu/faculty/lehmann/publ/ES&T 42, 4152-4158, 2008 Gaunt.pdf)

[26] http://www.biochar-international.org/

[27] Lehmann J, Campos CV, Macedo JLV, German L (2004) Sequential fractionation and sources of P in Amazonian Dark Earths. In: Glaser B, Woods WI (eds) Amazonian Dark Earths: exploration in time and space. Springer Verlag, Berlin, p. 113–123

[28] Lima HN, Schaefer CER, Mello JWV, Gilkes RJ, Ker JC (2002) Pedogenesis and pre-Colombian land use of “Terra Preta Anthrosols” (“Indian black earth”) of Western Amazonia. Geoderma 110:1–17 (http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V67-46HBK7W-1&_user=10&_coverDate=11/30/2002&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&

view=c&_searchStrId=1400277763&_rerunOrigin=google&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=4508ad2624a6527cb31e0d1a7f499c22)
[29] Zech W, Haumaier L, HempXing R (1990) Ecological aspects of soil organic matter in the tropical land use. In: McCarthy P, Clapp C, Malcolm RL, Bloom PR (eds) Humic substances in soil and crop sciences: selected readings. American Society of Agronomy, Madison, p. 187–202
[30] Solomon D, Lehmann J, Thies J, Schäfer T, Liang B, Kinyangi J, Neves E, Petersen J, Luizão F, Skjemstad J (2007) Molecular signature and sources of biochemical recalcitrance of organic C in Amazonian Dark Earths. Geochimica et Cosmochimica Acta 71:2285-2286. (http://www.css.cornell.edu/faculty/lehmann/publ/GeochimCosmochimActa 71, 2285-2298, 2007 Solomon.pdf)
[31] Lehmann J (2007) A handful of carbon. Nature 447:143
[32] http://www.thenergo.eu/fr
[33] http://terresacree.org/forevieg.htm
[34] Lal R (2004) Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304:1623-1627. (http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/304/5677/1623)
[35] http://www.futura-sciences.com/fr/news/t/developpement-durable-1/d/biocarburants-les-dangers-dune-utilisation-massive_10316/
[36] (http://www.css.cornell.edu/faculty/lehmann/research/terra preta/terrapretamain.html), Lehmann, Johannes
[37] Lehmann J (2007) Bio-energy in the black. Frontiers in Ecology and the Environment 5:381-387 (http://www.css.cornell.edu/faculty/lehmann/publ/FrontiersEcolEnv 5, 381-387, 2007 Lehmann.pdf)
[38] Winsley P (2007) Biochar and bioenergy production for climate change mitigation. *New Zealand Science Review* 64:5-10 (http://www.biochar-international.org/images/NZSR64_1_Winsley.pdf)
[39] Kern DC (2006) New Dark Earth experiment in the Tailandia City– Para-Brazil: the dream of Wim Sombroek. Congrès mondial des sciences de la terre, Philadelphie, PA, 9-15 juillet 2006.
[40] Rondon M, Lehmann J, Ramírez J, Hurtado M (2007) Biological nitrogen fixation by common beans (Phaseolus vulgaris L.) increases with bio-char additions. Biology and Fertility in Soils 43:699-708. (http://www.css.cornell.edu/faculty/lehmann/publ/BiolFertSoils 43, 699-708, 2007 Rondon.pdf)
[41] Yanai Y, Toyota K, Okazaki M (2007) Effects of charcoal addition on N_2O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments. Soil Science and Plant Nutrition 53:181-188. (http://www3.interscience.wiley.com/journal/118519541/abstract?CRETRY=1&SRETRY=0)
[42] Samkutty PJ, Gough RH (2002) Filtration treatment of dairy processing wastewater. *Journal of Environmental Science and Health*, Part A, Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering 37:195-199. (http://www.informaworld.com/smpp/content~db=all~content=a713629917)
[43] Ponge JF, André J, Bernier N, Gallet C (1994) La régénération naturelle, connaissances actuelles : le cas de l'épicéa en forêt de Macot (Savoie). *Revue forestière française* 46:25-45. (http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/50/60/07/PDF/Ponge_et_al._1994.pdf)
[44] Schatowitz B, Brandt G, Gafner F, Schlumpf E, Bühler R, Hasler P, Nussbaumer T (1994) Dioxin emissions from wood combustion. Chemosphere 29:2005-2013. (http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V74-48765TR-X&_user=10&_coverDate=12/31/1994&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1424528613&_rerunOrigin=google&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=3bf81b597b6c1c6305ec187c41f9b6c5)
[45] http://www.poitou-charentes-nature.asso.fr/Roselieres-hautes.html

Annexes

Articles connexes

- Charbon de bois
- Granulés de bois
- Forêt
- Terra preta
- Humus
- Pédologie
- Sol
- Argile
- Complexe argilo-humique
- Érosion
- Pollution des sols
- Cycle de l'azote
- Cycle du carbone

- Technique culturale simplifiée
- Agriculture naturelle
- Culture sur sols inversés
- Bois raméal fragmenté
- Marché du carbone
- Puits de carbone
- Séquestration du carbone
- Coopération décentralisée

Liens externes

- Site de l'*Institute for Governance & Sustainable Development* (http://www.igsd.org) (en)
- Site du projet international de l'*Initiative biochar* (http://www.biochar-international.org/home.html) (en)
- International Network for Environmental Compliance & Enforcement (http://www.inece.org) (en)
- Carbon-negative primary production: Role of biocarbon and challenges for organics in Aotearoa/New Zealand (http://www.organic-systems.org/journal/Vol 2(2)/pdf/02-13 HARRIS-HILL 2nd Hill edit accptd 07b.pdf), Journal *Organic systems* (en) [PDF]
- Page consacrée à la recherche sur le Biochar (http://www.css.cornell.edu/faculty/lehmann/biochar/Biochar_home.htm) (université Cornell) (en)
- Conférence 2007 *International Agrichar Initiative* (http://power.networksolutions.com/index.html) (en)
- Eprida Home Page (http://www.eprida.com) (consulté 2006-05-08)(en)
- Best Energies (http://www.bestenergies.com/) (site de production d'Agrochar) (consulté 2008-07-10) (en)
- Biochar Energy Corporation (http://biocharenergy.com) (en)
- Biochar Fund (http://www.biocharfund.com/) (en)
- Terra Preta (http://hypography.com/forums/terra-preta/3451-terra-preta-parent-thread-started-all.html) (« *Hypography discussion forum* » (consulté 2006-05-08) (en)
- Putting the carbon back: Black is the new green Nature (http://www.nature.com/nature/journal/v442/n7103/full/442624a.html) (journal *Nature*, consulté 2008-07-10) (en)
- Enhancing soil productivity with char (http://www.dynamotive.com/assets/articles/2007/2007.08 AG Professional.) pdf (consulté 2008-01-11) (en)
- Pyrolysis char rejunevates tired soils (http://www.biomassmagazine.com/article.jsp?article_id=1298&q=Dynamotive) (*Biomass Magazine*, consulté 2008-01-11) (en)
- A handful of carbon (http://www.nature.com/nature/journal/v447/n7141/full/447143a.html) (journal *Nature*, consulté 2008-01-11) (en)
- Liste de discussion (anglais) sur la Terra preta (http://terrapreta.bioenergylists.org/) (consulté 2008-07-10) (en)
- Page (anglaise) sur le Biochar (http://www.biochar.org) (en)
- "Special Report: Inspired by Ancient Amazonians, a Plan to Convert Trash into Environmental Treasure" (http://www.sciam.com/article.cfm?id=pyrolyisis-terra-preta-could-eliminate-garbage-generate-oil-carbon-sequestration) par Anne Casselman, in journal *Scientific American* ; mai 2007 ; (consulté 007-05-30) (en)
- Biochar as a Soil Amendment - A review of the Environmental Implications (http://orgprints.org/13268/01/Biochar_as_a_soil_amendment_-_a_review.pdf), par D. Woolf ; 2008 (consulté 2008-04-15) (en) [PDF]
- Documentaire australien TV sur le biochar (http://www.abc.net.au/catalyst/stories/s2012892.htm) (en)
- Limitations of Charcoal as an Effective Carbon Sink (http://www.sciencedaily.com/releases/2008/05/080501180247.htm) (consulté 2008-05-19) (en)
- Nicholas Comerford (http://international.ifas.ufl.edu/focus_newsletters/2007/february/nicholas-comerford.shtml) (consulté 2008-07-24) (en)
- Johannes Lehmann (http://www.css.cornell.edu/faculty/lehmann.html) (consulté 2008-05-24) (en)

- Newton P. de Souza Falcao (http://www.inpa.gov.br/cpca/newton.html) (consulté 2008-07-30)(en)
- Le biochar est-il vert ? (http://www.csf-desertification.org/index.php/desertification-et-son-combat/biochar) par Antoine Cornet et Richard Escadafal, Comité scientifique français de la désertification (CSFD) (fr)

- Portail de l’agriculture et l’agronomie
- Portail du bois et de la forêt

Sources et contributeurs de l’article

Biochar *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=96275194 *Contributeurs*: 007antoine, Abrahami, AgroL, Akiry, Al1, Albins, Bertol, BlaF, Bob08, CommonsDelinker, Coyote du 86, Eiffele, Gagea, Ggal, Herr Satz, Isaac Sanolnacov, Jfponge, Jmvernay, Justine59, Karg se, Lamiot, Linedwell, Lomita, Ludovic89, Nguyenld, Pautard, Poulos, Rhadamante, Richardbl, Romanc19s, Totodu74, VonTasha, Wart Dark, Xofc, Xorxar, Yodaspirine, 9 modifications anonymes

Source des images, licences et contributeurs

Image:Holzkohlegewinnung_im_Regenwald.jpg *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Holzkohlegewinnung_im_Regenwald.jpg *Licence*: GNU Free Documentation License *Contributeurs*: User Kelberul on de.wikipedia

Fichier:Tractor icon.svg *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Tractor_icon.svg *Licence*: Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0,2.5,2.0,1.0 *Contributeurs*: Spedona

Fichier:Silhouette of a Tree.svg *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Silhouette_of_a_Tree.svg *Licence*: Public Domain *Contributeurs*: Amada44

Licence

Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported
//creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/